



شبیه‌سازی اثرات تابش‌های پروتون و الکترون روی لایه‌های محافظ در سلول منطقی دیجیتال درون تراشه FPGA با استفاده از کد FLUKA

نفسه خسروی^۱، مجتبی تاجیک^{۱*} و بهزاد بقراطی^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران.

^۲دانشکده مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران.

*سمنان، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۴۱۱۶۷ - ۳۶۷۱۶

پست الکترونیکی: tajik@du.ac.ir

چکیده

در این مقاله اثرات تابش‌های پروتون و الکترون روی لایه‌های محافظ در سلول منطقی دیجیتال درون تراشه FPGA با استفاده از کد FLUKA شبیه‌سازی شده است. با استفاده از کد مونت کارلوی، ترابرد الکترون‌ها و پروتون‌ها در یک سلول منطقی مربوط به دروازه‌ی دیجیتال درون تراشه FPGA مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این شبیه‌سازی، حداکثر انرژی الکترون‌های و پروتون‌های وارد شده به سلول منطقی تراشه بین ۳۰ تا ۵۰ مگا الکترون ولت بوده و آثار اختلالات ناشی از تابش بر مواد نیمه‌هادی و همچنین برخی از اثرات مخرب تابش پرتوهای الکترون و پروتون در پنج ساختار متفاوت با به کار بردن لایه‌های آلومینیوم، سیلیکون، دی اکسید سیلیکون، بورن و اکسید بورن مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، به کار بردن لایه‌ی ضخیم دی اکسید سیلیکون در چند لایه‌ی متفاوت موجب کاهش آثار ناشی از اختلال‌ها نسبت به سایر ساختارها خواهد شد.

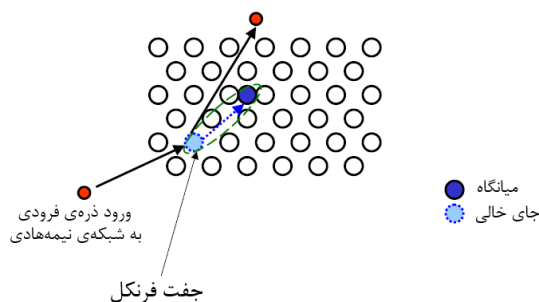
کلیدواژگان: سلول منطقی، پروتون، اثرات تابش، کد فلوکا، SEU.

۱. مقدمه

منجر به ایجاد اختلال در تجهیزات الکترونیکی شوند. از آنجایی که تشخیص اولیه تأثیرات رویدادهای منفرد اولین دغدغه‌ی بحث قابلیت اطمینان در قطعات الکترونیکی است، با بررسی سطح مقطع اختلال رویداد منفرد SEU که احتمال اثر برخورد یک یون منفرد بر قطعات می‌باشد، امکان این تشخیص فراهم می‌شود. نوع، ضخامت مواد و المان‌های بکار رفته در فرآیند ساخت قطعات می‌تواند نقش کلیدی در پاسخ

عملکرد صحیح و پایداری سیستم‌های الکترونیک در میدان‌های شدید پرتوهای یونیزان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور طراحی و بررسی کارایی این سیستم‌ها در این میدان‌ها، لازم و ضروری است، میزان تأثیرات مخرب پرتوهای پروتون و الکترون بر عملکرد آن‌ها محاسبه گردد. پرتوهای یون‌ساز با توجه به میزان انرژی که در قطعات الکترونیکی متشکل از نیمه‌هادی‌ها به جا می‌گذارند، می‌توانند

اولیه با سیستم مورد مطالعه است. اگر یک یون در فاصله معلوم با انرژی مشخصی حرکت کند اطلاع از کمیت LET به منظور مشخص نمودن میزان کاهش انرژی ذره قابل استفاده خواهد بود. هنگامی که یک یون درون ماده جامد نفوذ می‌کند، این امکان وجود دارد تا به حد کافی به یک هسته نزدیک شده و به این ترتیب خط سیر آن تا اندازه‌ای تغییر می‌کند. احتمال این رخداد به سطح مقطع پراکندگی مربوط می‌باشد. اتلاف انرژی ناشی از برهم‌کنش‌های کولنی $(\frac{dE}{dx})_{col}$ که منجر به یونش و برانگیختگی اتم‌ها می‌شود، انتقال خطی انرژی LET نامیده می‌شود. مسافتی که الکترون یا پروتون می‌تواند درون یک ماده مشخص حرکت کنند، تابعی از انرژی تابشی هستند. برای نمونه در مورد سیلیسیم، برای الکترون با انرژی یک مگاالکترون ولت این مسافت برابر 15cm و برای پروتون حدود $15\mu\text{m}$ می‌باشد [۳-۴]. با استفاده از کارت EVENTBIN کد FLUKA می‌توان انرژی به جای گذاشته شده از هر رویداد را محاسبه نمود. در نتیجه‌ی این رویدادها که می‌تواند برهم‌کنش‌های بنیادی بین یک ذره پارانرژی و عناصر نیمه‌هادی باشند، موجب برانگیختگی و یونش اتم‌ها شده و منجر می‌شوند که اتم‌ها از موقعیت عادی خود در شبکه بلوری جابجا شوند. در واقع انتقال انرژی در برخورد‌های کشسان یا ناکشسان ذرات می‌تواند اتم را از موقعیتش در شبکه کریستالی بیرون اندازد و باعث ایجاد جای خالی (vacancy) شود.



شکل (۱): نمایشی از نحوه‌ی جابه‌جایی اتم‌ها در اثر برهم‌کنش تابش فرودی با اتم.

مدار به تابش‌ها را ایفا نماید. براساس این‌که در طی دوره کاری یک تراشه نیمه‌هادی، اختلال رویداد منفرد نسبت به سایر رویدادهای مختل‌کننده، بیش‌تر رخ می‌دهد، می‌بایست چگونگی رفتار و میزان دفعات تکرار وقوع آن را بررسی نمود [۲۱].

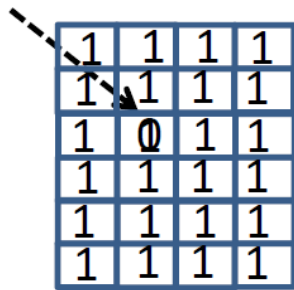
تراشه FPGA به دلیل برنامه‌پذیر بودن به طور وسیعی در مدارهای گوناگون به کار می‌رود و نقش مهمی را در پردازش سیگنال‌های خروجی از طبقات تقویت‌کننده موجود بر آن‌ها و حتی در آشکارسازها ایفا می‌کند. این قطعات منطقی قابل برنامه‌ریزی در خیلی از آزمایش‌های فیزیک انرژی‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن‌جا که سطح تابش‌های یون‌ساز همچون الکترون، پروتون و نوترون در محیط آزمایش‌های مزبور قابل ملاحظه می‌باشد، بهتر است رفتار قطعات منطقی در چنین محیط‌هایی به دقت بررسی شده و به منظور مقاوم‌سازی آنها در برابر این تابش‌ها راهکارهای مناسبی اتخاذ گردد. در این پژوهش برخی از اثرات تابش الکترون و پروتون روی لایه‌های محافظ در سلول منطقی دیجیتال درون تراشه FPGA در بازه‌ی انرژی ۳۰ تا ۵۰ مگاالکترون ولت با استفاده از کد مونت‌کارلو FLUKA مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲. مطالعات شبیه‌سازی

برای بررسی اثرات تابش با استفاده از روش حل مونت‌کارلو ابتدا ابعاد یا ساختار فیزیکی قطعه به دقت مدل‌سازی می‌شود و به دنبال آن محیط تابش تشریح می‌گردد. در محدوده‌ای که برخورد‌های متعددی با محیط هدف صورت می‌گیرد، یک رخداد واحد اساسی پاسخ مونت‌کارلو می‌باشد و در واقع تاریخچه‌ی کاملی از برهم‌کنش‌های یک ذره‌ی تابش منفرد و سایر ذرات تولیدی آن از جمله الکترون‌های ثانویه، فوتون‌ها و پاره‌های شکافت هسته‌ای با ساختار مورد نظر می‌باشد. منظور از کلمه‌ی "رویداد" (event) برهم‌کنش یک ذره‌ی تابشی

در این مقاله حجم حساس مورد مطالعه در همه‌ی ساختارها سیلیکون بوده و در اثر برخورد تابش به شبکه‌ی بلوری الکترون-حفره‌هایی در مدار تولید می‌گردد که منجر به ایجاد جریان‌های ناشی می‌شوند و در پی آن سبب بروز اختلال seu در مدار می‌باشند. در صورت تشخیص این اثر، می‌توان به کمک روش‌های نرم‌افزاری با قطع و وصل نمودن ولتاژ تغذیه این اختلال را برطرف نمود.

برای مثال می‌توان به تغییر بیت‌های سلول حافظه که ناشی از اثرات seu می‌باشد، اشاره نمود [۸].



شکل (۳): تغییر از یک به صفر.

در شکل (۳)، ذخیره‌سازی اطلاعات موجود در یک سلول حافظه، در اثر برخورد تابش مختل شده است.

۱.۲. ساختارهای تراشه‌های شبیه‌سازی شده

ابتدا ساختار یک تراشه منطقی قابل برنامه‌ریزی را درون محیط شبیه‌سازی کد مونت کارلوی فلوکا پیاده‌سازی نموده و سپس به بررسی تاثیر لایه چینی، رفتار مواد تشکیل‌دهنده در هر ساختار در برابر انرژی‌های مختلفی از تابش الکترون و پروتون پرداخته خواهد شد.

به منظور بررسی میزان انرژی به جای گذاشته شده ناشی از نفوذ ذرات یون ساز الکترون و پروتون درون ساختار تراشه ابتدا می‌بایست یک حجم برهم‌کنشی تعریف شود.

حجم حساس، قسمتی از تراشه می‌باشد که هندسه‌ی آن شبیه‌سازی شده و کاملاً درون حجم برهم‌کنشی قرار گرفته

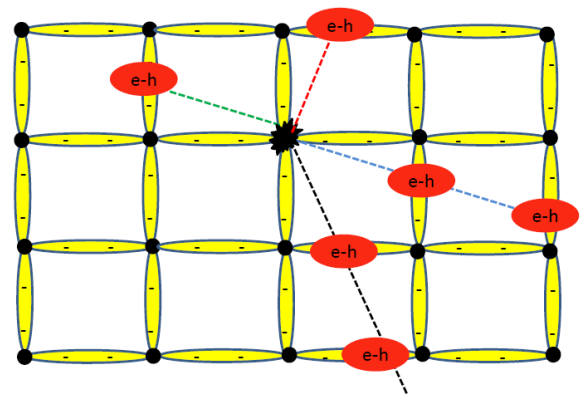
به جای خالی ایجاد شده در شبکه و فضای میان‌اتمی؛ جفت فرنگل گفته می‌شود [۵]. با فرض این‌که هر اتم یک‌بار جابه‌جا شود، تعداد این جابه‌جایی‌ها (Displacement per atom, Dpa) با استفاده از کارت USRBIN کد فلوکا، قابل محاسبه می‌باشد. این کارت برای شمارش جابه‌جایی‌های رخ داده در مواد از رابطه‌ی (۱) استفاده می‌نماید:

$$dpa = \frac{A}{VN_A\rho} N_F \quad (1)$$

ρ : چگالی جرمی ($\frac{g}{cm^3}$) A : جرم مولی ($\frac{g}{mol}$)، V : حجم (cm^3)، N_A : عدد آووگادرو (mol^{-1})، N_F : تعداد جفت‌های فرنگل.

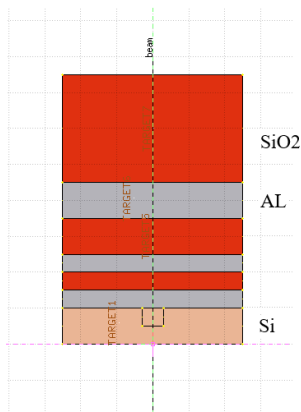
برای مثال $Dpa=0.3$ به این معنا می‌باشد که سه اتم از ده اتم، یک‌بار از درون ساختار شبکه خود جابه‌جا شده‌اند [۶].

آسیب جابه‌جایی، از آثار اختلالات دائمی به شمار می‌رود و می‌تواند سبب تغییرات بلندمدت در مشخصات قطعه و مدارهای داخلی آن شود. به عنوان مثال، قابلیت برنامه‌ریزی قطعه نیمه‌هادی مشخصی ممکن است برای همیشه مختل گردد. در شکل (۲) شبکه‌ی چهار وجهی ماده‌ی سیلیسیم مشاهده می‌شود که الکترون‌ها در پیوندهای اتمی به اشتراک گذاشته شده‌اند. انرژی مورد نیاز برای تولید یک جفت الکترون-حفره در این ماده $3/6 eV$ می‌باشد [۷].



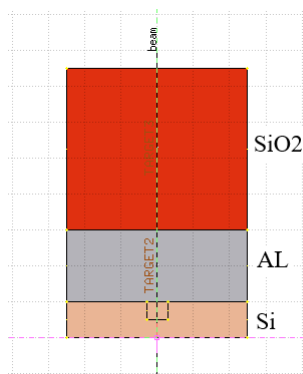
شکل (۲): ایجاد جفت الکترون حفره در شبکه سیلیسیم در اثر تابش

فرودی [۷].



شکل (۴): ساختار اول.

ساختار دوم: در شکل (۵) لایه‌های هم‌جنس در ساختار قبل
تجمیع شده‌اند (II).



شکل (۵): ساختار دوم.

ساختار سوم: در شکل (۶) ضخامت لایه‌های
دی‌اکسیدسیلیکون دو برابر ساختار اول شده است (III).

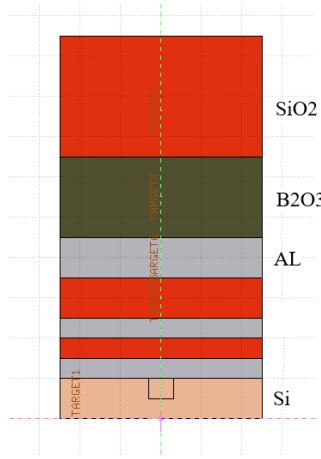
است. حجم برهم‌کنشی مکانی است که فرآیندهای رخ داده شده درون آن بررسی شده و نتیجه‌ی مستقیم آثار را می‌توان درون آن ملاحظه نمود.

در این شبیه‌سازی، حجمی به شکل مکعبی با ابعادی در مقیاس میکرومتر به عنوان حجم برهم‌کنشی در نظر گرفته شده و میزان جابه‌جایی اتم‌ها و انرژی بر جای گذاشته شده در حجم حساس به ابعاد نانومتر در ناحیه‌ی سیلیکون اندازه‌گیری شده است.

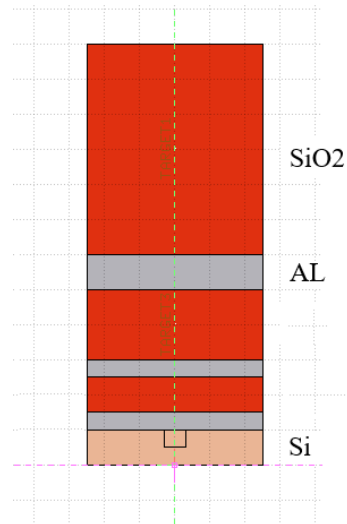
قطعات الکترونیکی در معرض باریکه‌ای از پرتوهای الکترون و پروتون در بازه‌ی انرژی ۳۰ تا ۵۰ مگا‌الکترون ولت قرار گرفته است. علت انتخاب این محدوده وجود پرتوهایی با این انرژی در محیط بیرونی سیستم آزمایش میونی CMS می‌باشد. میزان تخریب حاصل از ترابرد ذرات درون هندسه هدف مورد نظر به کمک کارت USRBIN، بخش DPA-SCO و انرژی بجای گذاشته شده در حجم هدف با کارت EVENTBIN محاسبه شده است.

چیدمان لایه‌های نسل جدیدی از تراشه‌های منطقی قابل برنامه‌ریزی FPGA و چگونگی پیاده‌سازی آن‌ها در پنج ساختار متفاوت با به کار بردن لایه‌های آلومینیوم، سیلیکون، دی‌اکسیدسیلیکون، بورن و اکسیدبورن مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل‌های مجزا نشان داده می‌شوند. در همه‌ی ساختارها از سیلیکون به عنوان آخرین لایه استفاده شده و حجم حساس در آن ناحیه قرار دارد.

ساختار اول: در شکل (۴) لایه‌های آلومینیوم و دی‌اکسیدسیلیکون به صورت یک‌درمیان قرار گرفته‌اند (I).



شکل (۸): ساختار پنجم.



شکل (۶): ساختار سوم.

۳. نتایج

۱،۳. محاسبه انرژی بجا گذاشته شده در حجم حساس

میزان انرژی بجا گذاشته شده به توان توقف ذره فرودی

برای یک جاذب با رابطه (۲) داده می شود. در این عبارت t

ضخامت جاذب و dE/dx توان توقف است [۹].

$$\Delta E = \int_0^t \left(\frac{dE}{dx} \right) dx \quad (2)$$

برای ذرات با حالت بار معین توان توقف با رابطه (۳)

داده می شود [۹]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad (3)$$

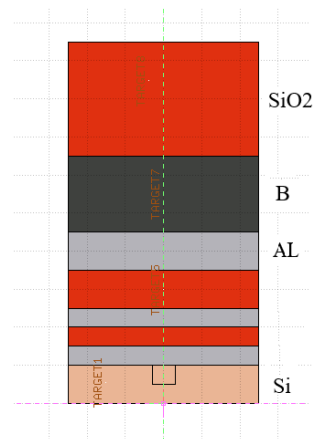
$$B \equiv Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

در این رابطه v و Z به ترتیب سرعت و بار ذره اولیه، N و Z چگالی تعداد و عدد اتمی، اتم های ماده جاذب، m_0 جرم سکون الکترون، e بار الکترون، c سرعت نور و پارامتر I برانگیختگی میانگین و پتانسیل یونش ماده ی جاذب هستند. برای ذرات باردار نسبیتی عبارت دوم B دارای اهمیت می باشد.

در شکل (۹-الف) برای الکترون ها بازه ی انرژی ۳۰ تا ۵۰ مگا الکترون ولت در حوزه نسبیتی است. بنابراین با توجه به

ساختار چهارم: در شکل (۷) با افزودن لایه ی بورن به چیدمان

ساختار اول ایجاد شده است (IV).



شکل (۷): ساختار چهارم.

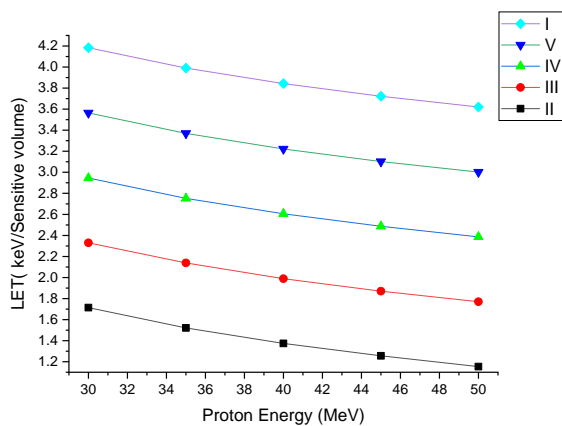
ساختار پنجم: در شکل (۸) بجای لایه ی بورن از لایه

اکسید بورن استفاده شده است (V).

حساس مورد مطالعه بجا گذاشته می‌شود. در جدول (۱) انرژی بجای گذاشته شده‌ی ناشی از تابش پرتو الکترون و پروتون با انرژی 50 MeV در حجم حساس ساختار II نشان داده شده است. میزان انرژی بجای گذاشته شده ناشی از پروتون‌ها بیش‌تر از ۶ برابر الکترون‌ها است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت به همان میزان اثرات تخریب پروتون‌ها از الکترون‌ها بیش‌تر است.

۲.۳. محاسبه تعداد جفت الکترون-حفره در حجم حساس

از آنجایی که انرژی‌های به جای مانده منجر به تولید جفت الکترون-حفره در سطح مدار می‌گردند و چون بررسی SEU منوط به تولید جفت الکترون‌ها می‌باشد، در ساختار II که مقاوم‌ترین ساختار نسبت به سایر ساختارهای مطالعه شده می‌باشد، در جدول (۱) تعداد جفت الکترون-حفره‌ی تولید شده ناشی از تابش پرتو الکترون و پروتون در حجم حساس ساختار II نشان داده شده است.

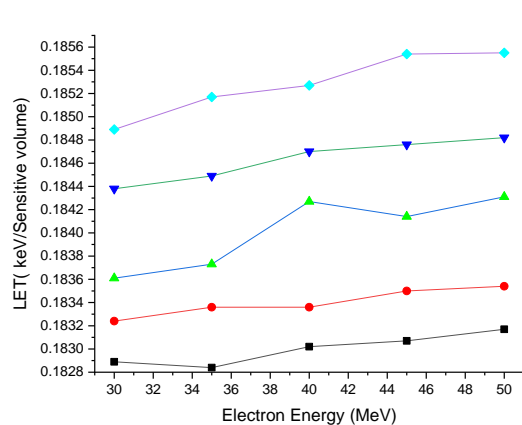


شکل (۹-ب): انتقال خطی انرژی در حجم حساس در اثر تابش پروتون.

رابطه (۳) با افزایش انرژی الکترون، توان توقف و معادل با آن انتقال خطی انرژی الکترون به ساختارها افزایش می‌یابد.

در شکل (۹-ب) چون توان توقف با توجه به رابطه (۳) برای پروتون‌ها با افزایش انرژی در بازه‌ی ۳۰ تا ۵۰ مگاالکترون ولت به طور پیوسته کاهش می‌یابد. بنابراین انتقال خطی انرژی (انرژی ذخیره شده) در ساختارها با افزایش انرژی پروتون فرودی کاهش می‌یابد.

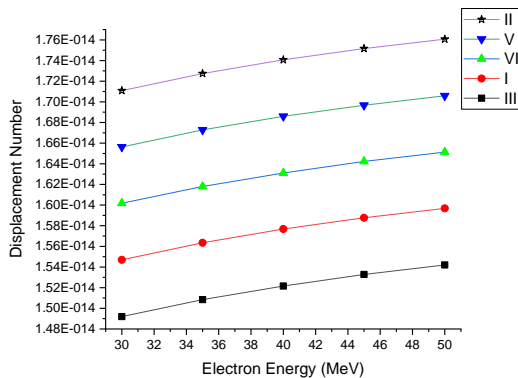
همان‌طور که در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود دو برابر کردن ضخامت لایه‌های دی‌اکسیدسیلیکون (III) در بین ساختارهای مورد مطالعه در برابر تابش الکترون موجب می‌شود، انرژی بیش‌تری در حجم حساس تخلیه شود و این ساختار موجب آسیب بیش‌تری در مدار می‌گردد و با توجه به شکل (۹-ب) در اثر تابش پروتون ساختاری که لایه‌های آلومینیوم و دی‌اکسیدسیلیکون به صورت یک‌درمیان قرار گرفته‌اند (I)، انرژی بیش‌تری در حجم حساس به جای می‌ماند.



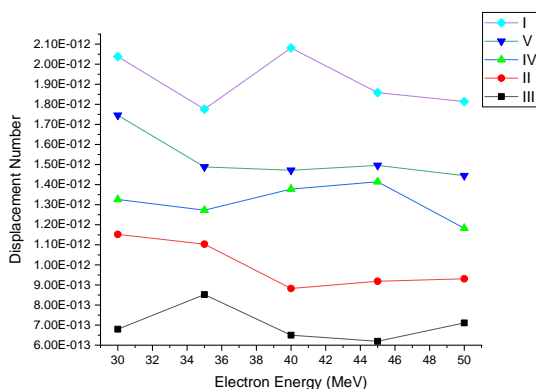
شکل (۹-الف): انتقال خطی انرژی در حجم حساس در اثر تابش پرتو الکترون.

با توجه به نمودارهای شکل (۹) مشاهده می‌شود، در ساختاری که لایه‌های هم‌جنس تجمیع شده‌اند (II)، انرژی کم‌تری در اثر تابش‌های ذرات الکترون و پروتون در حجم

در اثر تابش پرتوهای الکترون و پروتون برای پنج ساختار فوق نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می شود دو برابر کردن ضخامت لایه های دی اکسیدسیلیکون (III) در بین ساختارهای مورد مطالعه در برابر تابش الکترون موجب می شود تعداد اتم های بیش تری در حجم حساس جابه جا شوند و این ساختار موجب آسیب بیش تری در مدار می گردد. با توجه به شکل (۱۰-ب) در اثر تابش پروتون در ساختاری که لایه های آلومینیوم و دی اکسیدسیلیکون به صورت یک در میان قرار گرفته اند (I)، تعداد اتم های جابه جا شده بیش تر می باشد.



شکل (۱۰-الف): تعداد اتم های جا به جا شده در حجم حساس در اثر تابش پرتوی الکترون در ساختار های متفاوت.



شکل (۱۰-ب): تعداد اتم های جابه جا شده در حجم حساس در اثر تابش پرتوی پروتون در ساختارهای متفاوت.

جدول (۱): مقادیر انرژی به جای گذاشته و تعداد میانگین جفت

الکترون -حفره برای ساختار II در انرژی ۵۰ MeV.

نوع ذره	انرژی به جای گذاشته شده در حفره تولید شده در حجم حساس (KeV)	تعداد میانگین جفت الکترون -
الکترون	۰/۱۸۳۱۷	۵۰/۸۸۰۵۵۵۵۶
پروتون	۱/۱۵۳۴	۱۴۱۳۳/۴۸۷۶۵

با توجه به این که میزان انتقال انرژی پروتون به حجم حساس نسبت به الکترون بیش تر است. تعداد جفت الکترون -حفره تولید شده در اثر تابش پروتون نسبت به تابش الکترون در این انرژی بیش از ۲۸۰ برابر است که این میزان در ساختارهای دیگر به مراتب بیش تر می باشد.

پیشنهاد ساختار II از میان سایر ساختارها به علت نحوه ی چیدمان آن، مقاومت بهتری را در برابر تابش ها ایجاد نموده و موجب می شود انرژی کم تری به مدار انتقال یابد. با کاهش میزان انرژی تخلیه شده ناشی از نفوذ این ذرات یون ساز در عمق مورد نظر، احتمال برانگیخته شدن اتم ها و تغییر اطلاعات در سطح منطقی گیت مورد بررسی نیز کاهش یافته و یا از بین خواهد رفت. همچنین سایر آسیب های ناشی از پرتوها در نیمه هادی نیز به شدت کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به نقش جفت الکترون -حفره ها در ایجاد اختلال SEU این مقدار از جفت الکترون -حفره تولید شده در حجم حساس ساختار مذکور می تواند اثرات قابل ملاحظه ای بر جریان و ولتاژ مدار داشته باشد.

۳,۳. محاسبه تعداد اتم های جابه جا شده در حجم حساس

در شکل های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) نتایج شبیه سازی مربوط به تعداد اتم های جابه جا شده (Displacement Per Atoms)

تشکیل دهنده در چیدمان لایه‌ها و همچنین مقدار ضخامت آنها جهت مقاوم‌سازی تراشه بررسی شد. جالب توجه است ساختاری که در آن لایه‌های هم‌جنس تجمیع شده‌اند (II) در کاهش میزان انرژی بجای گذاشته شده موثرتر واقع شده است، اما برای پیش‌گیری از آثار ناشی از جابه‌جایی اتم‌ها دو برابر کردن ضخامت لایه‌های دی‌اکسیدسیلیکون (III) راه حل بهتری می‌باشد. با توجه به این‌که آسیب ناشی از SEU با میزان انرژی بجای گذاشته شده در مدار متناسب می‌باشد، بنابراین ساختار II به عنوان بهترین پیشنهاد از بین سایر ساختارهای بررسی شده در این پژوهش معرفی می‌گردد.

نتایج شبیه‌سازی، نشان می‌دهند که چیدمان لایه‌ها به روش ساختار III، با دو برابر کردن ضخامت لایه‌های دی‌اکسیدسیلیکون موجب مقاوم‌تر شدن تراشه در برابر تابش پروتون و الکترون شده و منجر می‌شود تعداد اتم‌های کم‌تری از شبکه ی سیلیسیوم جدا شوند.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی آثار ناشی از پرتوهای یون‌ساز پروتون و الکترون بروی یک سلول منطقی مربوط به گیت دیجیتالی موجود درون تراشه FPGA، با کد مونت‌کارلوی فلوکا بررسی‌هایی انجام گرفت و تاثیر نوع مواد

۵. مراجع

- [1] A. Robert Weller and H. Marcus. Monte Carlo Simulation of Single Event Effects. IEEE Trans. Nucl. Sci. 57 (2010) 1726-1746.
- [2] M. J. Gadlage and A. H. Roach. Electron-induced single-event upsets in 45-nm and 28-nm bulk CMOS SRAM-based FPGAs operating at nominal voltage. IEEE Trans. Nucl. Sci. 62 (2015) 2717-2724.
- [3] Jean-Luc Autran and D. Munteanu. SOFT ERRORS FROM PARTICLES TO CIRCUITS. Taylor & Francis Group, LLC, (2015).
- [4] R. Velazco, P. Fouillat and R. Reis. Radiation Effects on Embedded Systems. Springer (2007).
- [5] Space Radiation Effects on Microelectronics, NASA Jet Propulsion Laboratory. (2002) 118-120.
- [6] T. Spina and C. Scheuerlein. Correlation between the number of displacements per atom (dpa) and Tc after high energy irradiations of Nb₃Sn wires for the HL-LHC. IEEE, (2016).
- [7] رضانی احمد. مطالعه اثر تشعشع رادیواکتیو بر روی ادوات نیمه هادی و بررسی اثر تشعشع گاما و تابش هادرونی بر روی آشکارسازهای دیودی سیلیسیمی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- [8] S. Buchner and D. McMorrow. Overview of Single Event Effects. Washington, DC USA, (2015).
- [9] G. F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, (2000).